

文章编号: 1001-4888(2017)04-0573-07

## 薄壁弹体高速侵彻钢筋混凝土实验研究<sup>\*</sup>

赵南, 王可慧, 李明, 古仁红, 陈春林, 李名锐

(西北核技术研究所, 陕西西安 710024)

**摘要:** 设计了一种优化结构的薄壁高速侵彻弹体, 采用 YOUNG 方程预估弹体高速侵彻钢筋混凝土的侵彻深度, 通过建立三维有限元模型分析并计算了薄壁弹体高速侵彻 2.4m 和 2.8m 钢筋混凝土靶的能力和结构变形情况。在 100mm 口径的火炮上, 开展了 8kg 弹体高速侵彻钢筋混凝土靶实验, 考核了弹体的结构强度和侵彻能力。结果表明: 薄壁弹体高速侵彻钢筋混凝土靶板后结构完整, 在 1020m/s 和 1200m/s 速度下具备穿透 2.4m 和 2.8m 钢筋混凝土靶的能力。

**关键词:** 薄壁; 高速; 侵彻能力; 弹体结构; 钢筋混凝土

中图分类号: O385; O347.1 文献标识码: A DOI: 10.7520/1001-4888-16-179

### 0 引言

据统计, 世界上具有重要军事应用价值的地下工事大约有 1 千余处, 这些设施具有深埋、多层、加固等特点, 大多数主要以混凝土为防护材料, 埋深地下 3~12m<sup>[1-3]</sup>。为了有效打击该类目标, 各国都在积极研究高速深层侵彻弹体技术。目前, 对弹体高速侵彻混凝土已开展了相关实验研究, Forestal 等<sup>[4,5]</sup>进行了不同头型系数卵形弹在 1300~1700m/s 速度下的侵彻混凝土实验; 梁斌等<sup>[6]</sup>进行了 0.4kg 弹体在 1200m/s 的概念弹侵彻混凝土靶实验研究; 何翔等<sup>[7]</sup>开展了 800~1470m/s 速度下, 150g 实心弹丸高速侵彻混凝土实验; 武海军等<sup>[8]</sup>进行了 7 发 1.5kg 弹体在 800~1100m/s 速度下的非正侵彻混凝土实验。上述研究多侧重于单纯动能弹, 而对带有装药的结构弹研究较少。在高速侵彻钢筋混凝土条件下, 金属壳体头部会产生严重侵蚀, 弹身细长中空结构受弹道偏转的影响易产生弯曲、断裂, 弹尾受横向过载易破碎, 上述结构破坏直接导致装药裸露失效, 使其丧失作战能力。因此, 需通过提高弹体材料性能, 优化弹体结构设计, 深度挖掘弹体的侵彻能力, 提高弹体的结构强度和装填比, 保证弹体的毁伤威力。本文优化设计了一种薄壁侵彻结构弹, 开展了速度为 1020m/s 和 1200m/s 的高速侵靶实验, 分析了弹靶的变形情况和侵彻过程, 考核了弹体的结构强度和侵彻能力。

### 1 弹体设计

实验弹主要由壳体、模拟炸药和尾盖组成。弹重约 8kg, 长度约为 450mm, 头型系数为 3, 中段直径约为 67mm, 尾部直径约 72mm, 径厚比约为 1:10, 装填比约为 10%。实验弹如图 1 所示。



图 1 弹体实物图

Fig. 1 The picture of the projectiles

\* 收稿日期: 2016-09-21; 修回日期: 2016-11-22

通讯作者: 赵南(1985-), 男, 工程师, 主要研究领域: 爆炸与冲击动力学。Email: zhaonan@nint.ac.cn

弹材和尾盖均为 35CrMnSiA, 在 150~600℃ 范围内进行了一系列热处理, 得到该材料的最佳力学性能<sup>[9]</sup>, 如表 1 所示为弹体材料力学性能参数。

表 1 弹体材料力学性能参数

Tab. 1 Mechanical parameters of projectile material

材料名称	抗拉强度(MPa)	屈服强度(MPa)	断面收缩率(%)	延伸率(%)	冲击功(J)
35CrMnSiA	1700	1300	49	11	40

## 2 弹体结构强度分析和侵彻能力预估

### 2.1 侵彻能力预估

实验前采用 YOUNG 方程预估弹体的侵彻能力。该方程是在 3000 多次对土、岩石、混凝土等介质侵彻实验的基础上统计分析得到的。后来经过不断地修正和完善, 并在 1997 年推出了最新修正的公式<sup>[10]</sup>。

$$D = \begin{cases} 0.000018 KSN \left( \frac{M}{A} \right)^{0.7} (V - 30.5), & V > 61 \text{m/s} \\ 0.0008 KSN \left( \frac{M}{A} \right)^{0.7} \ln(1 + 2.15V^2 10^{-4}), & V \leq 61 \text{m/s} \end{cases}$$

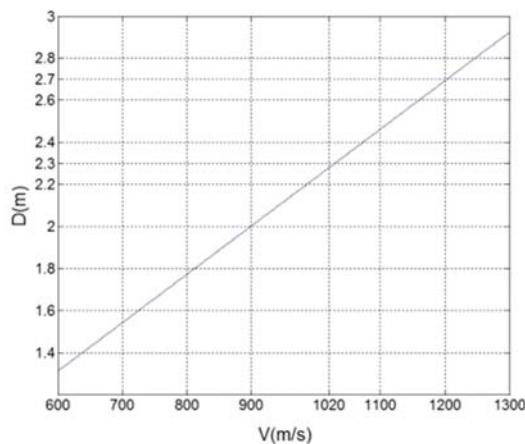


图 2 侵彻深度计算结果

Fig. 2 The calculational result of penetration depth

式中,  $D$  为侵彻深度(m);  $M$  为弹重(kg);  $A$  为弹体的横截面积( $\text{m}^2$ );  $V$  为弹速(m/s);  $K$  为侵彻修正系数;  $S$  为可侵彻性指标;  $N$  为弹头形状影响系数。将实验参数代入公式(1), 绘制侵彻深度和速度关系曲线图, 见图 2。其中在 1020m/s 和 1200m/s 速度下, 侵彻深度分别约为 2.3m 和 2.7m。计算结果可为实验靶板设计提供参考。

### 2.2 仿真结果对比

建立有限元模型分析并计算弹体高速侵彻钢筋混凝土的侵彻能力和结构变形情况。弹体采用弹塑性模型, 弹体材料为 35CrMnSiA, 模拟炸药为高分子材料, 数值仿真参数见表 2。

表 2 弹体材料参数

Tab. 2 Parameters of projectile material

材料	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	$E(\text{GPa})$	$\gamma$	$Y_S(\text{MPa})$	$E_H(\text{MPa})$	$\beta$
壳体	7.8	210	0.3	1300	3000	1
模拟炸药	1.9	11	0.32	320	100	1

混凝土靶采用 JHC 模型。材料数据取自 1998 年 Johnson-Holmquist 会议论文<sup>[11]</sup>。弹靶采用 1/2 模型, 弹靶尺寸与文中实验弹靶尺寸相同, 靶板边界为自由边界。计算域中只涉及弹和混凝土靶板两种介质, 忽略空气的作用, 不考虑弹与靶之间的滑动摩擦。在 1020m/s 速度下, 弹体侵彻钢筋混凝土靶的仿真结果如图 3、图 4 所示。

计算结果表明, 在 1020m/s 速度下, 弹体垂直贯穿靶板后结构基本完整, 仅弹头和弧线部发生少许塑性变形。出靶后弹体剩余速度约为 110m/s, 证明弹体具有继续侵彻的能力。

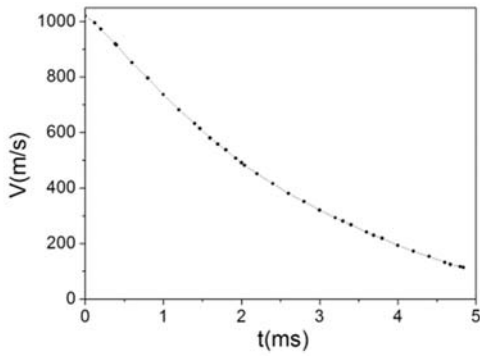


图 3 侵彻过程中弹丸速度随时间的变化曲线  
Fig. 3 The velocity histories of projectiles in penetrating

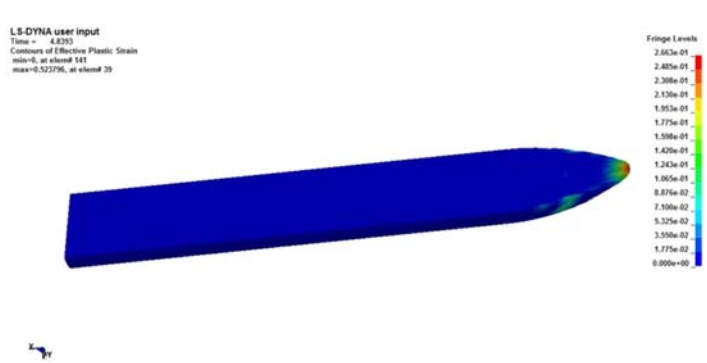


图 4 穿靶后弹体结构变形情况  
Fig. 4 Schematic of projectile on penetrating concrete target

### 3 实验

#### 3.1 靶板制作

根据 YOUNG 方程的预估结果,实验靶板设计成  $1.6\text{m} \times 1.6\text{m} \times 2.3\text{m}$  和  $1.6\text{m} \times 1.6\text{m} \times 0.5\text{m}$  两块混凝土组成的 C40 复合靶。靶板内置 10mm 螺纹钢钢筋网片,网片垂直于弹体入射面,均匀分布于靶板内,体积配筋率 0.6%。钢筋网片尺寸为  $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ ,层间距 30cm,靶板实测抗压强度为 44MPa。靶板布置情况如图 5 所示。



图 5 混凝土靶板实物图  
Fig. 5 The picture of the reinforced concrete targets



图 6 次口径弹托组装图  
Fig. 6 The packaging picture of the sabot

#### 3.2 次口径弹托设计

实验弹径小于 100mm 火炮口径,需采用次口径发射。弹托由卡瓣、助推板和底座组成。卡瓣起固定弹体、保证弹体运动姿态的作用,助推板可实现对实验弹施加持续推力,底座保证了膛内的气密性。弹托选用尼龙材料,比强度高,结构不易变形,可承受膛内火药气体的高过载,保证弹体在膛内均匀受力,使其达到预设速度。采用气动分离原理进行弹托分离,弹体出膛后,卡瓣在气动力的作用下分离。助推板和底座的强度较低,弹体撞靶瞬间,材料破碎,对实验影响可忽略不计。

#### 3.3 着靶速度测试技术

沿实验弹穿靶路线布置 3 块固定间距( $\Delta S$ )的铜丝网靶,铜丝分别通电,实验弹穿过网靶时,铜丝因破坏而断电,触发网靶测速记录仪记录断电时间( $t_n, n=1, 2, 3$ ),通过计算得到着靶速度。网靶测速系统如图 7 所示。

#### 3.4 实验布局

实验以 100mm 火炮作为发射平台,炮口距离靶面 8m,出炮口后实验弹穿透 3 层测速网靶,以预设



图7 网靶测速系统

Fig. 7 The velocity measuring system of meshes

速度撞击目标靶,撞靶姿态和侵彻全过程通过高速摄像系统全程记录。实验结束后拆卸靶板进行弹体回收。实验布局示意图见图8。

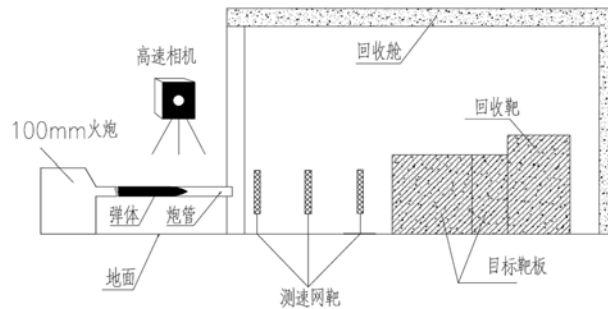


图8 实验布局示意图

Fig. 8 The schematic diagrams of experimental layout

## 4 实验结果及分析

### 4.1 靶板破坏情况分析

共进行了2发实验,网靶测得着速分别为1020m/s和1195m/s,编号为1#和2#。实验后靶板破坏情况如图9、图10所示。2.3m厚混凝土靶板被弹体穿透,正面和背面出现直径与弹径相当的侵彻弹洞。靶板正面形成了大面积的开坑区域,沿靶面中心产生大量的径向裂纹,裂纹成米字型扩展至靶板边缘,使靶板发生一定程度的崩裂破坏。实验1#靶面呈对称破坏,靶板背面弹洞居于中心位置,表明撞靶姿态为正撞击。实验2#靶正面左下方出现崩落,说明在侵彻过程中弹道向左下偏转。对比实验1#和2#可知,着速越大,靶板的破坏越严重。

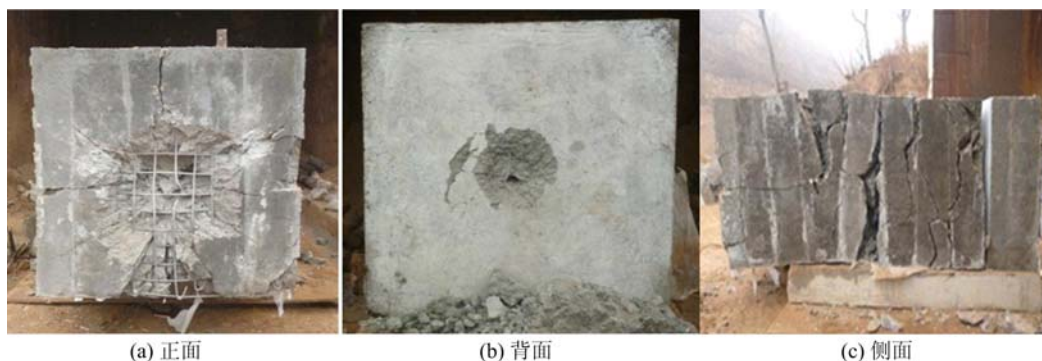


图9 实验1#靶板破坏情况:

Fig. 9 The breakage of experiment 1#

### 4.2 弹体结构变形分析

侵彻前后弹体状态比较如图11所示,图11(a)中由上到下分别为实验前、实验1#和2#,从外观上看,撞靶后实验弹的头部结构基本完好,经测量,比较实验前弹体长度减小,质量降低,头部直径变大,弹



图10 实验2#靶板破坏情况

Fig. 10 The breakage of experiment 2#

身外径减小,这是由侵彻过程中弹体与钢筋混凝土靶之间撞击及相对运动产生的侵蚀/墩粗及侧壁擦蚀所致。分析认为,弹体在高速撞击靶板时,在弹靶接触面附近形成高温高压的区域<sup>[12]</sup>,由于压力超过弹体的屈服强度,材料呈半流体状态,在冲击压缩应力及高温软化的作用下弹体发生侵蚀/墩粗变形,同时弹靶之间的摩擦引起侧壁擦蚀。对比实验1#和2#可知,随着弹体着速的增大,弹靶作用力变大,侵蚀/墩粗越来越严重。

由于靶介质的非均匀性或实验弹着靶姿态的失稳,使得弹体在侵彻过程中发生弹道偏转,在弯矩的作用下弹身易弯曲、断裂,弹体尾部受横向过载易破裂变形。通过对比入靶和出靶的弹洞位置可以判断,实验2#弹体在侵彻过程中发生了较为明显的弹道偏转,由图11(b)可知,弹身在穿靶后未发生弯曲变形,尾部结构未发生破坏。

实验弹1#侵彻变形不明显,认为弹体结构设计满足1020m/s速度侵靶的强度要求。实验弹2#侵蚀程度较高,头部变形较大,针对深层侵彻弹的作用效应<sup>[13]</sup>,认为弹体在高速侵彻过程中,侵蚀变形存在极限,既弹体装药结构不受侵蚀破坏的影响,因此,可认为实验弹2#结构设计基本满足要求。

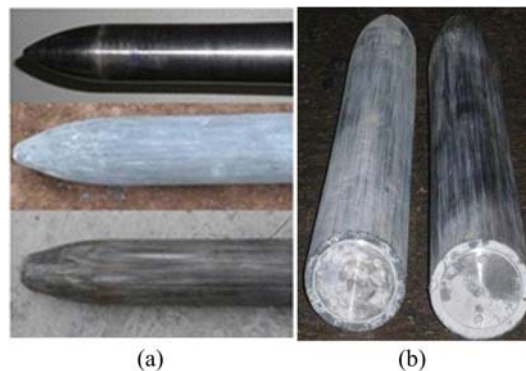


图11 侵彻前后弹体照片

Fig. 11 The photo of projectiles after the penetration experiment

### 4.3 弹体侵彻能力分析

测量发现,实验1#弹体穿透2.3m钢筋混凝土靶后,继续侵彻挡靶约0.1m,总侵彻深度约为2.4m。实验2#弹体穿透2.3m钢筋混凝土靶和0.5m挡靶后,嵌入到回收舱内的木材中,说明弹体在穿透2.8m钢筋混凝土靶板后有继续侵彻的能力,认为侵彻深度约2.8m。实验弹穿靶状态如图12所示。

YOUNG方程计算结果与实验结果基本一致,说明YOUNG方程的计算结果具有参考价值。忽略应变率效应和加工问题,使用YOUNG方程进行缩比计算,弹体的几何缩比不能超过设计尺寸的 $1/3 \sim 1/4$ <sup>[10]</sup>。按上述原则,弹体结构不变,将实验弹按2.3倍几何放大,质量100kg,采用YOUNG方程计算弹体侵彻C40钢筋混凝土的侵彻能力。计算结果如图13所示,在1020m/s速度下,侵彻深度约为6m;在1200m/s速度下,侵彻深度约为7.1m。



图 12 实验弹穿靶状态

Fig. 12 The penetrating target state of the projectiles

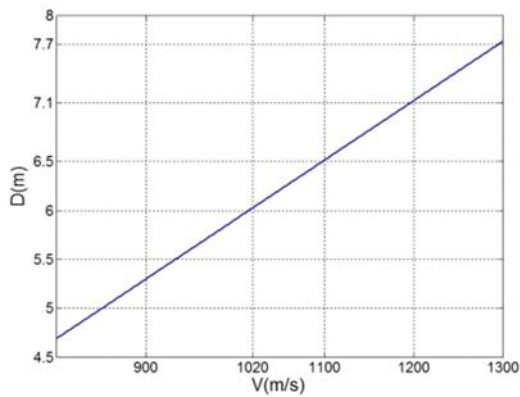


图 13 侵彻深度计算结果

Fig. 13 The calculational result of penetration depth

弹头部发生较大塑性变形,装药及尾部结构完整,认为实验弹结构基本满足 1200m/s 速度侵彻的强度要求;

(3) 采用 YOUNG 方程预估了大尺寸弹丸的侵彻能力,弹体结构不变,按 2.3 倍几何放大,质量 100kg,在 1020m/s 速度下侵彻 C40 钢筋混凝土,侵彻深度可达 6m;在 1200m/s 速度下,侵彻深度约为 7.1m。

#### 参考文献:

- [1] 赵晓宁. 高速弹体对混凝土侵彻效应研究[D]. 南京理工大学, 2011 (ZHAO Xiaoning. Study on the effect of projectiles high-velocity normal penetrating into concrete targets [D]. Nanjing University of Science and Technology, 2011 (in Chinese))
- [2] 罗翌. 西方攻击加固深埋目标的战斗部[J]. 飞航导弹, 1998(12):24-30 (LUO Yi. The western countries' warhead of attacking deep-underground reinforced target[J]. Aerodynamic Missile Journal, 1998(12):24-30 (in Chinese))
- [3] 张学伦, 曾焱. 钻地战斗部与地下目标毁伤关系的分析[J]. 四川兵工学报, 2008, 29(3):6-8 (ZHANG Xuelun, ZENG Yi. Analysis for relation between EPW and damaged underground target effect[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2008, 29(3):6-8 (in Chinese))
- [4] Forrestal M J, Frew D J, Hanchak S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 1996, 18(5):465-476.
- [5] Forrestal M J, Altman B S, Carigle J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1994, 15(4):395-405.
- [6] 梁斌, 陈小伟, 姬永强, 等. 先进钻地弹概念弹的次口径高速深侵彻实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(1):1-9 (LIANG Bin, CHEN Xiaowei, JI Yongqiang, et al. Experimental study on deep penetration of reduced-scale advanced earth penetrating weapon[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(1):1-9 (in Chinese))

## 5 结论

本文设计了一种薄壁侵彻结构弹,开展了 8kg 弹体在 1020m/s 和 1200m/s 速度下的侵彻实验,考核了弹体的结构强度和侵彻能力,结论如下:

(1) 弹体在 1020m/s 速度下侵彻钢筋混凝土靶板,侵彻深度约为 2.4m,回收的实验弹塑性变形不明显,结构保持完整,说明实验弹结构满足 1020m/s 速度侵彻的强度要求;

(2) 弹体在 1200m/s 速度下贯穿 2.8m 厚钢筋混凝土靶板后,有继续侵彻的能力,回收的实验

- [7] 何翔, 徐翔云, 孙桂娟, 等. 弹体高速侵彻混凝土的效应实验[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(1):1-6 (HE Xiang, XU Xiangyun, SUN Guijuan, et al. Experimental investigation on projectiles' high-velocity penetration into concrete targets[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(1):1-6 (in Chinese))
- [8] 武海军, 黄风雷, 王一楠. 高速弹体非正侵彻混凝土试验研究[C]. 第八届全国爆炸力学学术会议论文集, 江西, 2007:488-494 (WU Haijun, HUANG Fenglei, WANG Yinan, et al. Study of projectile non-normal penetrating reinforced concrete with high speed[C]. Proceedings of the Eighth National Conference on Mechanics, Jiangxi, 2007:488-494 (in Chinese))
- [9] 赵生伟, 古仁红, 初哲, 等. 大装填比弹侵彻钢筋混凝土实验研究[J]. 中国工程科学, 2009, 11(8):44-47 (ZHAO Shengwei, GU Renhong, CHU Zhe, et al. Experimental investigation of large-loading projectile penetrating[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(8):44-47 (in Chinese))
- [10] Young C W. Penetration Equations[R]. SNL:UAS, SAND97-2426/UC-705, 1997.
- [11] Holmquist T J, Johnson G R. A computational constitutive model for concrete subject to large strains, high strain rate, and high pressures[C]. 14th International Symposium on Ballistics, 1993:591-600.
- [12] 王可慧, 耿宝刚, 初哲, 等. 弹体高速侵彻钢筋混凝土靶的结构变形及质量损失的实验研究[J]. 高压物理学报, 2014, 28(1):61-68 (WANG Kehui, GENG Baogang, CHU Zhe, et al. Experimental studies on structural response and mass loss of high velocity projectiles penetrating into reinforced concrete targets[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2014, 28(1):61-68 (in Chinese))
- [13] 陈小伟. 动能深侵彻弹的力学设计(D:侵彻/穿甲理论和弹体壁厚分析[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6):499-505 (CHEN Xiaowei. Mechanics of structural design of EPW(D: The penetration/perforation theory and the analysis on the cartridge of projectile[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(6):499-505 (in Chinese))

## Experimental Study of High Speed Penetration of Thin-wall Projectile in Steel Reinforced Concrete

ZHAO Nan, WANG Ke-hui, LI Ming, GU Ren-hong, CHEN Chun-lin, LI Ming-ru  
(North West Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

**Abstract:** A high speed penetrator with thin wall optimized structure was designed. The penetration depth in steel reinforced concrete of this projectile was preestimated by YOUNG equation. By means of three-dimensional finite element model, the penetration capability and structure deformation of this projectile were analyzed and calculated, under the condition of high speed penetration in steel reinforced concrete targets with 2.4m and 2.8m thickness respectively. Using 100mm caliber cannon, experiment of 8kg projectile high speed penetration in steel reinforced concrete target was carried out to evaluate its structural strength and penetration ability. Experimental results show that the projectile structure is still integral after high speed penetration in steel reinforced concrete target; this thin wall projectile has the ability to penetrate steel reinforced concrete targets with 2.4m and 2.8m at speed of 1020m/s and 1200m/s respectively.

**Keywords:** thin-wall; high speed; penetration performance; projectile structure; steel reinforced concrete